

READ実験

安部 隆士¹・藤田 和央¹・若林 昭²・伊地智 幸一²

READ (Reentry Environment Advanced Diagnostics) Experiment

By

Takashi ABE¹, Kazuhisa FUJITA¹, Akira WAKABAYASHI², Kouichi IJICHI²

Abstract : In the READ experiment, the in-flight measurement of the radiation, emanating from the shock layer generated in front of the USERS reentry module during the reentry flight, was successfully performed. The radiation generated at the shock layer was introduced into the onboard spectrometer in the USERS reentry module through the optical fiber. During the flight experiment, the spectrum of the radiation was recorded on the on-board data recorder and was successfully recovered after retrieval of the vehicle. The measured data shows that the spectrum was contaminated by the radiation other than the radiation emanating from the shock layer, and its intensity was stronger than was expected. The spectrum at the altitude of around 90 km shows a strong influence of the ablation gas while the spectrum at the lower altitude shows an influence of the albedo of Earth surface.

1. はじめに

惑星探査においては、探査プローブを用いたミッションは、より直接的な情報を得られると言う点で有効であり、近年の探査ミッションでは NASA のガリレオや一連の火星探査機に見られるような当該惑星へ探査プローブを投入するミッションや、スターダスト、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の MUSES-C計画[1]といったサンプルリターンミッションも行なわれている。これらのミッションでは、惑星到達時に行われるエアロブレーキや惑星間軌道からの大気再突入など、機体が遭遇する熱空気力学的飛行環境は極めて厳しい。そのため、そのような飛行環境の原因としての衝撃層内高エンタルピ気流からの空力加熱、輻射加熱からいかに機体を防御するかが設計のキーとなる。また、近年注目されている完全再使用型輸送システムの開発においても、いかに軽量で信頼性の高い熱防御システム (thermal protection system; TPS) を開発できるかが重要な技術課題となっている。

TPS を含めた機体の設計とミッション計画では、飛行環境の予測、TPS の特性の把握、及び高エンタルピ気流と機体表面の相互作用など、加熱環境に関する総合的な理解が必要であるが、このうち飛行環境の予測値は設計の最も基礎となる情報である。機体が低密度領域を高速度で飛行する場合、衝撃層内は熱的にも化学的にも非平衡

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA)

² (財) 無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF)

状態となることが知られており、飛行環境の予測は困難となっている。これまで多くの研究者がこの問題に取り組み、衝撃層内の熱的化学的モデルを提唱してきたが、定量的な評価を行う上で未だにこれらのモデルが、十分な精度を達成していないと考えられており、TPSの工学的設計においては、大きなマージンを織り込んでいるのが現状である。この結果、機体重量に対するTPSの占める割合の増大を招いている。この状況を打開すべく、近年アメリカをはじめ、欧州や日本でも、衝撃層内の熱的化学的非平衡現象を明らかにし、より正確に予測できるモデルを提案しようと活発に研究が進められるようになってきた。

解析モデルの信頼性が低いと考えられている理由の一つが、地上設備により飛行環境を再現することが困難なために、実験によるモデルの検証が不十分なことである。特にTPSの試験を行なうに際しては、試験気流が飛行環境と異なることに加えて気流の特性が明らかでない場合が多く、TPSの特性の正確な評価が困難である。一方、再突入機を用いた飛行実験は、高コストで実験機会が限られるものの、実飛行環境が再現できるという点で重要な意義を持つ。このような背景から宇宙科学研究所(現JAXA宇宙科学研究本部)では、EXPRESS計画において、再突入飛行実験(RTEX)の一部として、環境光学計測実験が計画されたものの、衛星の打ち上げの失敗により、実験そのものも実施不能となっていた[2]。一方、この衛星は、幸いにもその後、回収され、搭載の実験機器は、十分再突入環境に十分耐えていることが確認されている。その後、無人宇宙実験システム研究開発機構(Institute of Unmanned Space Experiment Free Flyer; USEF)との共同研究として、無人宇宙実験システム(Unmanned Space Experiment Recovery System; USERS)の再突入機(Reentry vehicle; REV)を利用したCFB(Cheeper, Faster, and Better) missionの一つとして、再度、再突入飛行環境光学計測実験(Reentry Environment Advanced Diagnostics; READ)を計画し、平成15年5月30日のREV再突入の際に本実験を行った。本稿では以下にREAD実験の概要と、得られたフライトデータの速報を記す。

2. READ 実験

2.1. 実験の目的

EXPRESS計画におけるRTEX実験と同様に、READ実験は、USERSのREV再突入時に機体前面に形成される衝撃層内の高エンタルピ気流中において、励起された気体分子からの放射光の視線方向積分値を取得し、その分光を行い、実飛行環境下で高度・速度とともに変化する各種化学種の発光強度を測定して、各種温度履歴および化学組成履歴を決定するための放射データを取得することを目的としている。本実験により、実飛行下での衝撃層内の熱的化学的環境における放射データが取得され、広く用いられている流れ場やアブレータの解析モデルを検証し、改良する上で貴重な情報を与えることが期待された。

2.2. 器機構成

READ実験は、基本的にRTEX実験の構成をベースとして設計されている。その概念図を図1に、また構成機器のリストを表1に示す。実験ではREVよみ点に取り付けられた光計測ヘッド(OHD)と呼ばれる光学機器により衝撃層内の放射光を機体内部に取り込む。これを光ファイバ(OFB)により分光器(SPM)まで導いて分光し、分光イメージをデジタル信号に変換して、制御ユニット(CEU)に記録する。CEUはREAD実験の一連の動作を制御するシーケンサーであり、同時に分光イメージ信号や各種HKデータを記録する。READ実験系は固有の一

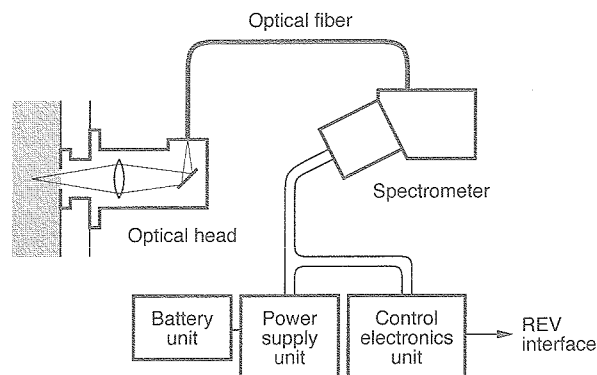


図1 READ 実験システム概念図

次電池 (BAT) を保有し、電源ユニット (PSU) は BAT を用いて READ 実験の各種電源を提供している。

READ 各コンポーネントは REV 内部に艤装される。REV は推進モジュール (PM) と接続されてリエントリモジュール (REM) を形成する。READ の艤装概略を図2に示す。READ 器機は USERS の環境基準を満足するように、振動試験および熱真空試験を行って、その品質を認定した。

光計測ヘッド

OHD は宇宙科学研究所により開発された。OHD は衝撃層内の輻射光を REV 内部に取り込む光学装置であり、REV 機体軸上淀み点位置にアブレタと構造体シェルを貫くように取り付けられる。その構造は図3に示すようになっており、高温気体と高温アブレタに接触する部位には、京セラ株式会社製のジルコニア (ZrO_2) のエントランスチューブを用いて輻射光を取り入れるようになっている。取り込まれた輻射光は合成石英のレンズにより集められ、反射鏡により直角に曲げられた後光ファイバへと導入される。アブレタの損耗や熱膨張によりもたらされるエントランスチューブの変位は、レンズ後方に設けられたベローズにより吸収されるように設計されている。光ファイバに取り入れられる輻射光は、エントランスチューブの先端に設けられた 4ϕ の小穴直近の外部空間からのものであるよう設計されている。大気を高速飛行中は、この空間は高温の空気で占められるため、取り入れられる輻射光は、そのような高温空気からのものであることになる。ただし、後述するように、それ以外にも地球アルベドや、場合によっては、太陽光が直接ないし間接に入射する可能性も考慮する必要がある。

OHD は、その取り付け方法の特殊なことから REV システムの保全に対するインパクトが大きいため、その開発においては通常の認定試験に加え、アークヒーターによる加熱試験を行った[3][4]。アーク加熱試験により、エントランスチューブ材質としては SiC や Si_3N_4 は不適當で、 ZrO_2 が適當であることが分かっている。

光ファイバ

OFB は三菱電線工業株式会社により製作された。分光波長領域として紫外領域に注目しているため、OFB として紫外波長領域まで透過率の高い合成石英を素材とし、ポリイミド系被覆を施した UV-VIS タイプの光ファイバを採用した。コア径は $200\mu m$ 、被覆を含めたファイバ径は $270\mu m$ であり、 $190\sim 700\text{ nm}$ の波長域で十分な透過率が得られている。これを 19 本バンドルし、USERS の打上げ/再突入環境の機械的環境に耐えるように SUS303 及びテフロン製のフレキシブルチューブで保護した上で、REV の構造体に取りつけた(図2)。OHD によりフォーカス

表1 READ 構成機器

略号	ユニット名称	説明
OHD	Optical head	光計測ヘッド
OFB	Optical fiber	光ファイバ
SPM	Spectrometer	分光器
CEU	Control	制御ユニット
PSU	Power supply unit	電源ユニット
BAT	Battery unit	電池

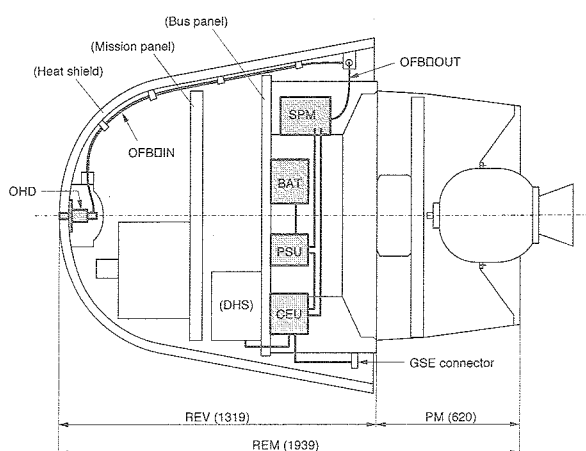


図2 READ 実験機器の艤装全体図

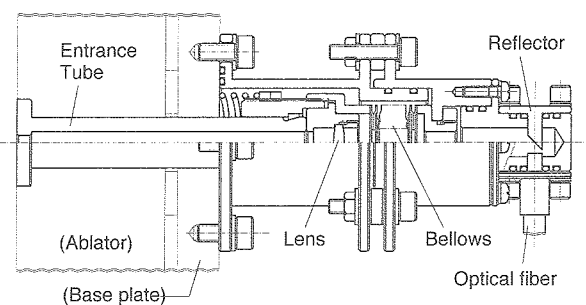


図3 光計測ヘッド (OHD) の構造

された輻射光は、OFBによりSPMへ導入される。SPM側では19本の光ファイバを縦列に並べ、そのまま光学スリットとして用いている。

分光器

SPMはポリクロメータ分光器とCCDカメラから構成される。ポリクロメータはREADミッションのために株式会社東京インストルメンツ/ベルノ技研(株)により

新規開発されたコンパクトフラットイメージ分光器で、F値は3.8程度である。CCDはANDOR Technology社製のペルチェ冷却タイプCCD ModelDU420-UVをベースにANDOR Technology社が開発したもので、真空環境下での使用のためペルチェ高温側に銅ヒートシンクを用い、耐放射線対策のためのRad-hard素子の採用などの改良を加え、USERSの機械的環境に耐えるような補強を施している。CCDは水平1024×垂直256 pixelの受光面を持ち、垂直フレームトランスファ方式により撮像して垂直方向をバインドするため、最小有効露光時間は32msとなっている。SPM全体としての理論分散は0.44 nm/pixel、分解能はFWHMで1.4 nm以下である。

制御ユニット、電源ユニット、及び一次電池

CEU及びPSUは日本電気株式会社(現NEC東芝スペースシステム)により開発された。CEUはREAD実験のシーケンスのすべてを管理し、SPMとPSUを制御し、SPMより取得されたスペクトルイメージとREAD各コンポーネントのヘルスデータを記録するシーケンサであり、REVの制御装置(DHS)とコマンド/テレメトリインタフェースを有する。PSUはBATから供給される一次電力をレギュレートして、READ全コンポーネントの安定電源として機能する。

BATは宇宙科学研究所により開発された。電池素子として松下電器産業株式会社の二酸化マンガンリチウム電池CR2(定格3V, 750mAh)を用いている。これを直列10×並列12素子接続し、定格30V, 9AH, 負荷接続時でノミナル24Vの電池を実現している。

2.3. 運用方法

READ実験システムは、出来るだけUSERSシステムとのインタフェースを簡素化するという設計思想から、ON/OFFのリレー信号と8bitのステータス信号のみをREVシステム間インタフェース(I/F)として有する。READの電源投入は、REV DHSから送られるリレー信号により行なわれた。CEUにはプリセットされたシーケンスがプログラムされており、READ器機は電源投入後このプログラムに従って動作する。このため、再突入運用前にUSERS軌道のレンジングを行なって再突入軌道を予測し、CEUにプログラムされたスペクトル計測期間が、再突入経路上の所定の飛行高度をカバーするようなタイミングでREADの電源を投入するという手法を用いた。

電源投入後、READ機器はCEUのプログラムに従って表2に示す各動作モードを逐次実行する。

Mode Aはウォームアップモード開始までの待機である。この間、USERSはREMを分離し、REMはRBMに点火して軌道離脱し、REVはPMを分離して再突入を開始する。長秒時の待機モードが設けられている理由は、REM分離前のイベントとしてREAD電源を投入しなけ

表2 READ動作モード

名称	期間	動作内容
Mode A	7800 s	CEUのタイマによる待機
Mode B	600 s	SPMのウォームアップ
Mode C	350 s	スペクトル計測

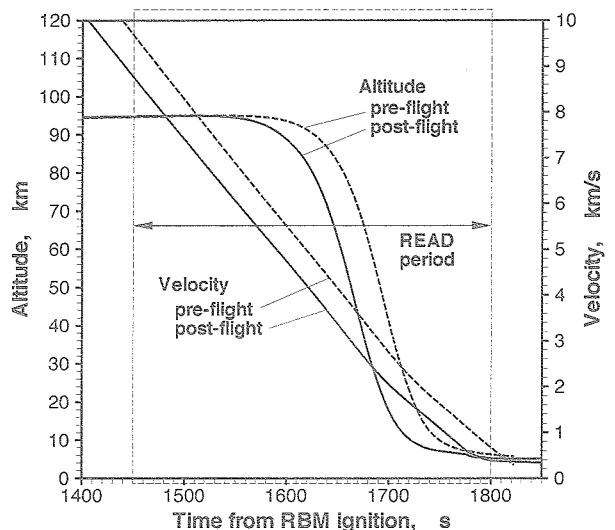


図4 USERS REV再突入軌道上におけるREADスペクトル計測期間 (Mode C動作期間)

ればならないためである。待機モード終了後、Mode B へ移行し、SPM の CCD ベルチェ素子に通電して冷却を開始する。最後に Mode C へ移行して輻射スペクトルを 1 Hz のサンプリングレートで取得する。

READ 実験においては各スペクトル画像が取得された瞬間の REV の高度、速度、姿勢が特定される必要がある。再突入軌道に沿った REV の高度、速度、姿勢は REV システムによって計測され、REV 時刻に対して REV のデータレコーダに記録される。一方、READ 実験は CEU 固有のタイマーに従って制御されるため、スペクトル画像取得タイミングをステータス信号として REV に逐次通知し、REV 時刻に対して REV のデータレコーダに記録することで、各スペクトルが取得された瞬間の REV の飛行状態が特定できるよう考慮されている。

3. 実験結果

3.1 再突入運用

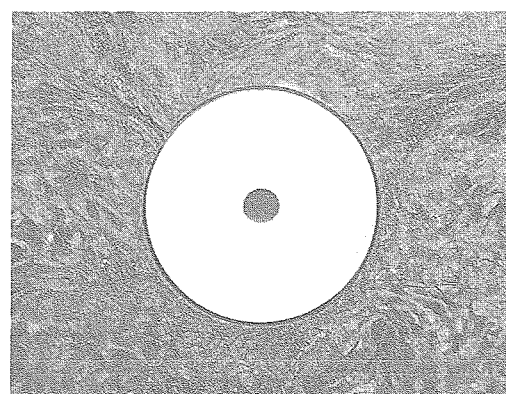
USERS は 2002 年 9 月 10 日に種子島宇宙センターから H-IIA ロケット 3号機によって打ち上げられ、軌道上で超電導材料製造実験などの運用を約 9ヵ月行なった後、2003 年 5 月 30 日に再突入運用を行なった。REM は同日午前 4 時 6 分 (JST) に分離され、午前 5 時 45 分に RBM を点火し軌道を離脱、6 時 23 分頃に小笠原東方沖の海上に着水し、回収された。

再突入軌道に沿った飛行高度と対地速度の時間履歴 (pre-flight 予測値) とスペクトル計測期間の関係は図4の破線で示すように計画されていた。分光計測は、輻射強度が十分強くなると予想される高度 100 km から 20 km までの軌道に沿って毎秒 1 回ずつ行なうことを目標としているが、実際には軌道決定精度の誤差を考慮して、その前後に約 60 秒のマージンを確保し、全体として 350 秒間の計測 (Mode C) を行なう計画であった。図に実線で示したのはポストフライト解析により推定された再突入軌道の時間履歴であり、予測よりも全体として時間が早くなっている。しかし、当初の 60 秒のマージンにより、分光計測はほぼ目標とした高度範囲で行なわれたと考えられる。

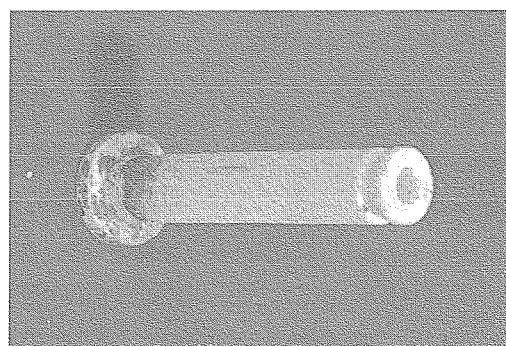
3.2 器機の健全性

READ 器機はバス器機チェックアウトの一貫として、打上げ後の 2002 年 9 月 23 日に、また再突入前の 2003 年 4 月 6 日に、それぞれチェックアウト (ON/OFF 機能確認およびステータス確認) を行なった。REV 回収・分解後、各コンポーネントの外観検査を行なったところ、機械的な損傷は認められなかった。OFB は断線なく 19 本とも健全であり、設計の妥当性が実証された。保安上もっとも重要である OHD も損傷が無かった。OHD エントランスチューブの飛行後の外観を図5に示す。図5 (b) に示すように、チューブの円筒外面 (アプレータとの接触面) にはアブレーションガスが内部に浸入したことを示す形跡も認められない。このことから、今回採用した OHD の構造は、耐熱および保安の機能を果たすことが実証されたと言える。

READ 実験では、BAT 電流、電圧および温度、PSU 5V 電圧、SPM 温度、および ADC 温度の 6 点をセルフモニタして CEU に 1 Hz で記録している。飛行状態での各データの時間履歴は、最終認証試験時のそれとほぼ同じ特徴を示していることが確認されており、各電子機器が期待された機能を実現したことが推定される。



(a) アプレータ取付状態



(b) 取り外し状態での全景

図5 飛行後の OHD エントランスチューブ

表3 スペクトル概要

時刻 (s)	スペクトルの状態
1~42	太陽光がエントランスチューブで散乱された光と思われるスペクトル。長波長域で飽和。紫外部にも原子/分子スペクトルは確認されない
43~54	紫外~可視の広域で分子スペクトル。一部飽和
55~214	広い波長領域でスペクトルは飽和
215~22	紫外域にNOと思われるスペクトル。長波長側は飽和
221~350	太陽散乱光または地球アルベドと思われるスペクトル。速度が遅く原子/分子スペクトルは観測されていない

3.3. スペクトルデータ

READ 実験では 350 秒間、延べ 350 のスペクトルデータが取得された。そのおおよその分類を時系列 (Mode-C 開始時刻からの相対値) で表3に示す (飛行状態とのおおよその対応は図4を参照)。

USERS REV の再突入は、洋上回収など回収条件の制約から日昇後であったため、地球アルベドや太陽光散乱の影響は危惧されていた。前者については全体としてそれほど強くなく、また注目している紫外領域では弱いと予想していたため特別な対処を行なっていなかった。事実、フライトでも波長が 400 nm 以下では地球アルベドの影響は十分小さかったことが分かっている。一方太陽光の散乱については、エントランスチューブからの散乱光が OFB 光取込口に入らないような光学設計を行なっていた。しかし OHD は、熱応力で破壊しないような取付手法を採用するという思想から、光路上にベローズを設けた準可動構造になっている (図3)。OHD 取付時点では、エントランスチューブ入口縁からの光が OFB に入射しないように調整したが、打上げ環境、あるいは熱的な環境の影響でアライメントのずれが発生し、エントランスチューブ入口縁の散乱光が OFB に入射する状態になっていたのではないかと推定される。スペクトルが取得された 43~54 sec の期間は、REV 機体軸と太陽方向のなす角が 60° 以上と大きかったことが分かっており、この間は太陽光の散乱光がほとんど OFB に入射せず、広い波長領域で分子スペクトルが取得できたものと考えられる。

計測時刻 55 sec 以降はスペクトル強度は急激に増加して広い領域で飽和してしまい、その後徐々に強度が低下して 215 sec 以降に NO が観測されるまでは、意味のあるスペクトルを得ることができなかった。この原因として、(1)高温となったエントランスチューブ自身の放射が OFB に入射した、(2) プレフライト解析[4]で予測したスペクトル強度が過小評価であった、という2つの可能性が考えられる。前者は太陽散乱光が OFB に入射したのと同様に光学軸のずれが原因であり、ここには示さないが、この効果を考慮すればスペクトルデータの履歴がかなり説明できるようである。しかし一方で、プレフライト予測値が過小評価だったという可能性もあり、今後流れ場や輻射強度の解析手法、および光学系を含めた詳細な再検討が必要であると考えている。

4. スペクトルの詳細

取得されたスペクトルのうち有効と思われるものの中から、特徴的なスペクトルを例として図6に示す。図6(a)に示したのは、Mode-C 開始から 48 sec 後のスペクトルであり、高度 89 km、飛行速度 7.5 km/s の条件下で、一方 (b) は 218 sec 後、高度 34 km/s、飛行速度 3.4 km/s の条件下で取得されたスペクトルであると推定されて

いる。縦軸は $W/sr \cdot m^2 \cdot \text{\AA}$ 単位の相対値であり、READ 光学系の光学効率の補整をかけて衝撃層内の視線方向の放射強度に直してある。なお、信号が飽和しているものについては除いてある。

スペクトルの発光種を特定するために、輻射解析コードである SPRADIAN-v1.5-PL1.4 [5] を用いて解析を行なったところ、幾つかの強いバンドスペクトルが再現できなかった。そこで SPRADIAN で解析できる二原子分子について、衝撃層内に存在すると予測されるものを再検討し、新たに CH, NH, OH, CH 等の分子種について解析が行なえるようにデータベースを更新した (SPRADIAN-v1.5-PL1.5)。このようにして、発光種として候補となるものについて放射スペクトルを計算して、図6中に比較のために示した。ここでは発光種の特定だけに注目してあるため、各バンドスペクトルを計算する際に用いた温度や密度は任意に選んであり、各バンドスペクトル間の放射強度の相対関係は意味がない。

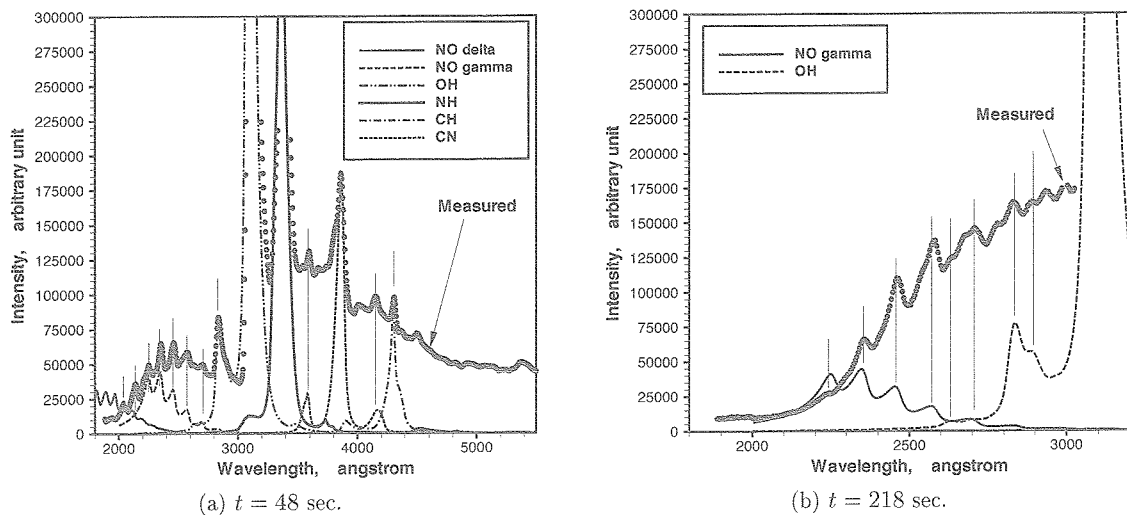


図6 実験で得られたスペクトル

ところで、READ 実験の光学系の設計はプレフライト解析による放射強度の予測に基づいて行われた [4]。図7に示したのは、広く用いられている Park モデル [6] を用いて REV 周り流れ場を飛行経路に沿って CFD 解析し、輻射コード SPRADIAN-v1.5-PL1.4 [5] によって淀み点法線方向の放射強度積分値を予測した結果である。アブレーション生成物は影響が小さいと考えて、解析では考慮していなかった。プレフライトの予測では、比較的高い高度から N_2^+ や N_2 の発光が強く観測され、低高度では NO の発光が強いこと、また広い高度範囲で可視域 ($>330\text{nm}$) での発光強度はほとんど変化しないことが推定された。

図6(a) は高度 89 km の場合であるため、図7の結果と直接的な比較は行なえないが、スペクトルとして期待された N_2^+ や N_2 はほとんど見られず、また高高度ではほとんど発光が期待されていなかった NO の発光が強いことが分かる。また、OH, NH などの水素原子を含む活性種や、CN や CH といった炭素原子を含む活性種の発光も認められることが分かった。これら H, C 原子はアブレーターから発生すると考えられるが、OH や NH は大気構成元素である O や N を含むため、アブレータ生成物と大気との反応は予想以上に衝撃層内で活発に進行していることを窺わせる。

図6にはまだ未特定の発光が含まれていると考えられるため、ここから直ちに温度などの定量的な情報を引き出すことはできない。しかしバンドスペクトル形状は比較的明瞭であるため、スペクトルフィッティング法 [7] により回転温度、振動温度などの情報をえることは可能であると期待できる。ただし、図6で示した CH, OH, NH などのバンドスペクトルの幾つかは P, Q, R ブランチ以外にサテライトブランチを持つ複雑なスペクトル構造をしており、3 ブランチ解析しか行なえない SPRADIAN-v1.5 では正確に取扱えない。そこで現在、より正確にサテラ

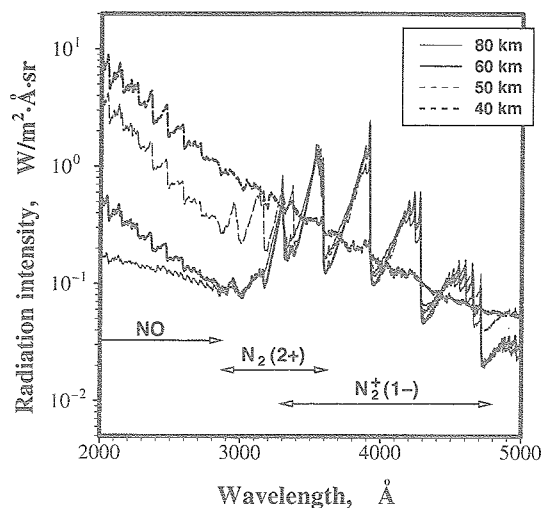


図7 淀み点法線方向の輻射強度スペクトル

イトブランチまで解析できる SPRADIAN-v1.6[8]を修正するとともにデータベースを更新する作業を行なっている。

今後、REVの再突入軌道/姿勢の高精度な推定、軌道に沿ったアブレーション挙動の解析、およびアブレーションを考慮したCFD解析および輻射解析などを総合的に融合して行ない、READ実験で得られたスペクトルと比較検討することで、アブレーションを伴う再突入飛行体の飛行環境の理解のための貴重な情報がえられるものと期待している。

5. まとめ

国内で初めて onborad で再突入環境の輻射分光計測を行なうという READ 実験の試みは、器機の不具合も無く成功裏にその運用を終え、現在フライトデータの詳細な解析を進めている。とくに、アブレーションガス由来の輻射が予想外に認められたことは、アブレータの挙動把握も含めて理解をして行く必要があることを示唆している。

READ 器機がほぼ期待された機能を発揮したという事実は、その設計の妥当性を実証し、CFB ミッションのポテンシャルを実証できたと言う点で評価できるだろう。残念ながら軌道上の多くの条件で有効な分光データを得ることができなかったという事実は、軌道上輻射計測の難しさを改めて示すとともに、既存の熱化学モデルによる飛行環境評価の問題点を示唆する結果となった。READ 実験で実証された手法や示された問題は、今後の再突入実験に活かされると期待される。

後記

この実験を計画するにあたり、雛田教授（宇宙科学研究所）に多大のご支援をいただきました。ここに謝意を表します。

次世代型無人宇宙実験システム (USERS) は、通商産業省及び新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて、財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF) が開発した宇宙実験システムである。本発表は、USEFとの共同研究により JAXA 宇宙科学研究本部 (旧宇宙科学研究所) が計画した再突入飛行環境光学計測

実験 (READ) について報告したものである。

参考文献

- [1] 宇宙科学研究所 SES データセンター, 『M-V-5 / MUSES-C 飛翔実験計画書』, SES-TD-02-006, 平成 15 年 1 月.
- [2] M.Hinada,T.Abe,Y.Inatani,A.Ajimine and T.Fuji,"Development of Experimental Reentry Space System EXPRESS," ISTS 94-g-05,1994.
- [3] 藤田和央, 山田哲哉, 稲谷芳文, 安部隆士, 政井和博, 『USERS 再突入機による READ 実験』, 第 41 回宇宙科学技術連合講演会, 97-1-9, かでる 2・7, 札幌市, 1997 年 10 月.
- [4] 藤田和央, 安部隆士, 雛田元紀, 濱一守, 新宮正三, 市蘭浩一, 『USERS 再突入機による再突入環境光学計測実験』, 第 44 回宇宙科学技術連合講演会, 00-3F15, アクロス福岡, 福岡県, 2000 年 10 月.
- [5] Fujita,K.and Abe,T., ``SPRADIAN,Structured Package for Radiation Analysis : Theory and Application, "The Institute of Space and Astronautical Science Report, No.669,1997.
- [6] Park,C., `Review of Chemical-Kinetic Problems of Future NASA Missions,I: Earth Entries," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, pp.385-398,Vol.7,No.3,1993.
- [7] Fujita,K.,Sato,S.,Abe,T.,and Ebinuma,Y., `Experimental Investigation of Air Radiation from behind a Strong Shock Wave," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, pp.77-82,Vol.16,No.1,2002.
- [8] 藤田和央, 佐藤俊逸, 安部隆士, 『高精度輻射解析を用いた衝撃波管による温度計測の再評価』, 平成 11 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 平成 11 年 12 月.